

## Фундаментальные связи «состав – структура – параметры приема» в современных композитах на основе сегнетоэлектрических кристаллов

А.Н. Исаева, В.Ю. Тополов

*Южный федеральный университет, Физический факультет, 344090 Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: aisaeva@sfedu.ru*

Исследование фундаментальных связей между составом, структурой и комплексом параметров приема композитов на основе сегнетоэлектриков (СЭ) представляется актуальным, в частности, после выхода в свет работы [1], в которой представлен набор модифицированных параметров приема, тесно связанных с электромеханическими свойствами материала. Цель проводимого исследования – анализ параметров приема с учетом состава, физических свойств компонентов, связности и микрогеометрических характеристик пьезоактивных композитов.

В настоящей работе рассмотрена система параметров приема композитов типов 2–2 и 1–3 (Рис. 1). В данных композитах основным пьезоэлектрическим компонентом является кристалл СЭ твердого раствора с определенной доменной структурой, формируемой при поляризации вдоль кристаллографического направления [001]. Среди систем твердых растворов представляют интерес  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$  (PMN-хРТ) и  $[\text{Li}_v(\text{K}_{1-y}\text{Na}_y)_{1-v}](\text{Nb}_{1-z}\text{Ta}_z)\text{O}_3:\text{Mn}$  (KNNTL-Mn). Наряду с традиционными параметрами приема  $(Q_{3j}^*)^2 = d_{3j}^* g_{3j}^*$ , связанными с отношением «сигнал-шум» [2], нами рассмотрены следующие модифицированные параметры приема композитов [3]:

а) максимальный коэффициент передачи:

$$\lambda_{3j,m}^* = [(k_{3j}^*)^{-1} - ((k_{3j}^*)^{-2} - 1)^{1/2}]^2;$$

б) отношение максимальной выходной электрической энергии образца к максимальной накопленной электрической энергией:

$$L_{3j}^* = \lambda_{3j,m}^* / (k_{3j}^*)^2;$$

в) параметр приема, связанный с воздействием на образец однородного механического напряжения:

$$F_{3j}^{*\sigma} = L_{3j}^* (Q_{3j}^*)^2;$$

г) параметр приема, связанный с воздействием на образец однородной механической деформации:

$$F_{3j}^{*\xi} = F_{3j}^{*\sigma} / (s_{jj}^{*E} s_{jj}^{*D}).$$

Приведенные выше параметры приема зависят от эффективных пьезокоэффициентов  $d_{3j}^*$ ,  $g_{3j}^*$ , коэффициентов электромеханической связи  $k_{3j}^*$  и упругих податливостей  $s_{jj}^{*E}$  и  $s_{jj}^{*D}$  композита. Индексы  $j = 1; 2$  соответствуют поперечному пьезоэффекту, а  $j = 3$  – продольному пьезоэффекту. Соответствующие эффективные свойства композитов, изображенных на Рис. 1, определены с помощью матричного метода [2, 3] и метода эффективного поля [3]. Сравнение системы параметров приема традиционных свинецсодержащих и новых бессвинцовых композитов с аналогичной микрогеометрией [3] является актуальным для оценки эффективности бессвинцовых материалов.

Примеры концентрационных зависимостей параметров приема  $F_{3j}^{*\sigma}(m)$  композитов «кристалл – полимер» представлены графически на Рисунке 2. Примечательно, что важный в практическом смысле параметр приема  $F_{33}^{*\sigma}$  бессвинцового 1–3-композита «кристалл KNNTL-Mn – полиуретан» (см. кривую 5 на Рис. 2б) больше  $F_{33}^{*\sigma}$  ряда 1–3-композитов на основе кристалла PMN-хРТ (см. кривые 2–4 на Рис. 2б). При этом продольный пьезомодуль  $d_{33}$  кристаллов PMN-хРТ вблизи морфотропной фазовой границы примерно в 4-5 раз больше, чем  $d_{33}$  кристалла KNNTL-Mn [2, 3]. Вместе с тем пьезокоэффициент  $g_{33}$  кристалла KNNTL-Mn примерно в 2-3 раза превышает  $g_{33}$  кристаллов

PMN-xPT, и это обстоятельство существенно влияет на параметры приема ( $Q_{33}^*$ )<sup>2</sup> и  $F_{33}^{*\sigma}$ . Дополнительно отметим большую анизотропию параметров приема ( $Q_{3j}^*$ )<sup>2</sup>,  $F_{3j}^{*\sigma}$  и  $F_{3j}^{*\xi}$  исследованных композитов со связностями 2–2 (Рис. 2а), 2–2–0 и 1–3 [3].

Проведенное впервые [3] исследование расширенного набора параметров приема 1–3-композитов позволяет классифицировать данные материалы и указать преимущества или недостатки конкретного композита в плане эффективности сбора и преобразования энергии. Формирование концепции параметров приема как функций многих переменных, характеризующих состав и структуру композитов на основе СЭ, важно для лучшего понимания специфики сбора и преобразования энергии в пьезоактивных композитах, а также для их применений в сенсорных, энергосберегающих, гидроакустических и других устройствах.

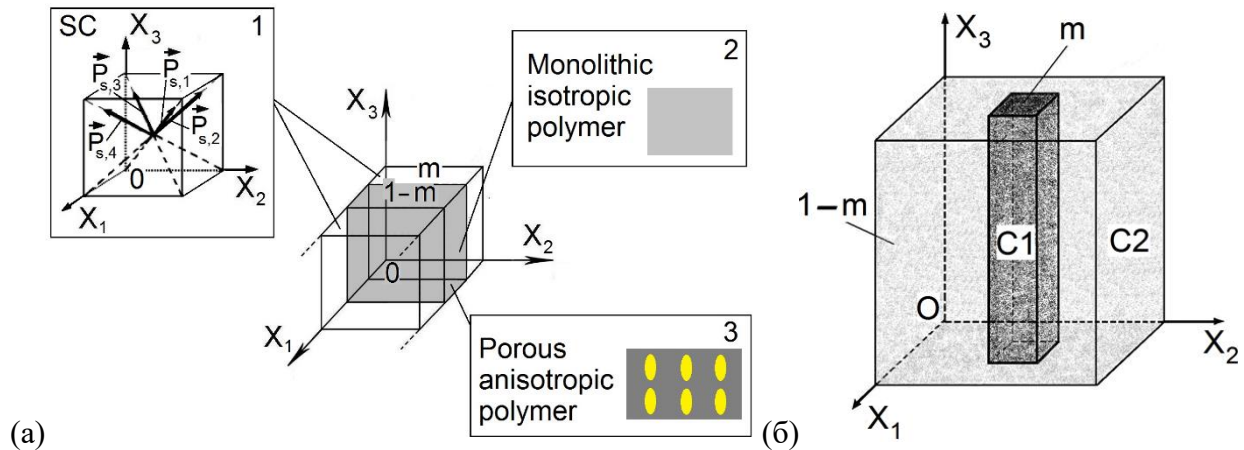


Рисунок 1. Схематические изображения пьезоактивных композитов типа 2–2 (а) и 1–3 (б) [2] на основе кристаллов (SC или C1).  $m$  – объемная концентрация кристаллического компонента. Координатная ось  $OX_3$  является осью поляризации композитных образцов.

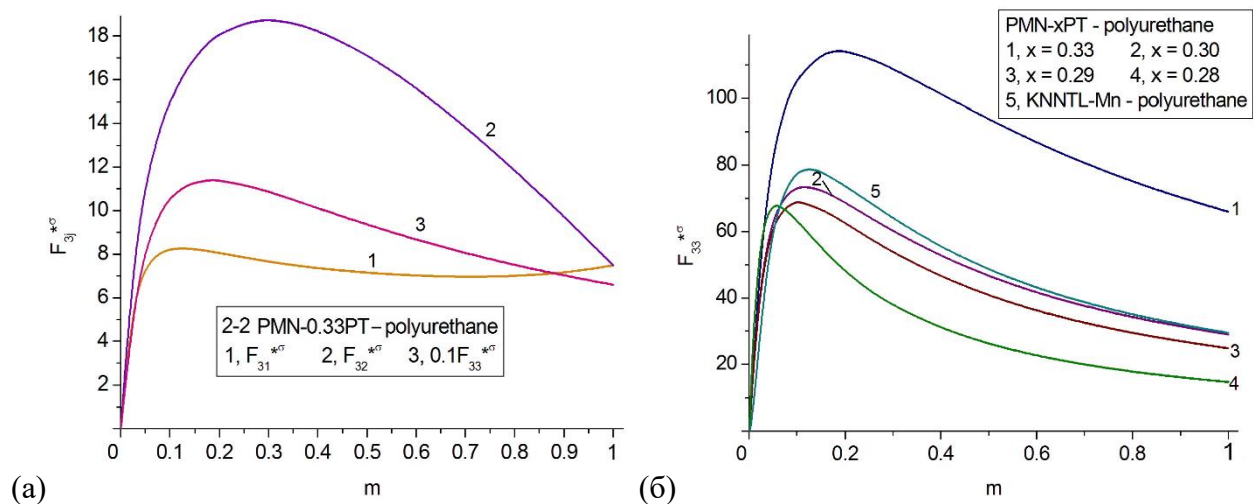


Рисунок 2. Примеры концентрационных зависимостей параметров приема  $F_{3j}^{*\sigma}$  (в  $10^{-12}$  Па<sup>-1</sup>) композитов со связностями 2–2 (а) и 1–3 [3] (б).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90163.

1. J.I. Roscow, H. Pearce, H. Khanbareh, et al., *Eur. Phys. J. Special Topics* **228**, 1537 (2019).
2. C.R. Bowen, V.Yu. Topolov, H.A. Kim, *Modern Piezoelectric Energy-Harvesting Materials* (Cham: Springer International), 9 (2016).
3. В.Ю. Тополов, А.Н. Исаева, *ЖТФ* **91**, 968 (2021).